

計画研究 D01

## トポロジカル凝縮系の理論

田仲 由喜夫 / 名古屋大学 大学院工学研究科 教授

理論家で構成される D 班は、すでに A-C 班の項目で述べてきたように、各班の実験・理論グループとの共同研究を有効に推し進めて研究を行っている。また D 班独自の成果も多数あげた。

### 1. ドープしたトポロジカル絶縁体のトポロジカル超伝導状態 (田仲、佐藤; C01 班と連携)

トポロジカル絶縁体である  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  に Cu を挿入すると、キャリアドープにより金属化し、低温で超伝導状態になることが最近知られるようになった。田仲・佐藤は瀬川 (C01)・安藤 (C01 連携) らの協力のもと、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  がエッジ状態をもつトポロジカル超伝導体であることを明らかにした。表面マヨラナフェルミオンのエネルギー分散関係が、トポロジカル絶縁体由来の構造変化 (図 1(a)) を起こすことを示し、瀬川らが観測したトンネルコンダクタンス (図 1(b) は素子の模式図) のゼロバイアスピークを説明した [1]。またトポロジカル超伝導体のスピン帯磁率、比熱の計算を超伝導状態で行った。その結果、比熱、スピン帯磁率の測定を行うことで、超伝導の対称性を決定する事が出来ることを示した [2]。またトポロジカル超伝導体と従来型の偶パリティの超伝導体接合においては、Josephson 電流が特異な温度依存性を示すことを明らかにした。

### 2. スピン三重項超流動におけるトポロジカル転移 (水島、佐藤; B01 班と連携)

超流動  $^3\text{He-B}$  相はトポロジカル超流動体であり、その表面状態にはバルクの波動関数のトポロジーによって安定性が保証されたマヨラナフェルミオンが現れる。実際、B 班野村らの音響インピーダンスの測定によってマヨラナフェルミオンと思われる励起状態が確認されている。水島・佐藤は、 $^3\text{He-B}$  相のマヨラナフェルミオンが磁場下でどのように振る舞うかを理論的に調べた。 $^3\text{He-B}$  相は、トポロジカル絶縁体と同様に時間反転対称性によってトポロジカルな安定性が与えられている為、磁場をかけ、時間反転対称性を破るとマヨラナフェルミオンは安定でなくなると予想される。ところが、実際には磁場を表面に垂直にかけたときのみマヨラナフェルミオンは消失して、磁場を平行にかけたときには、マヨラナフェルミオンは安定に存在し続ける。この理由は明らかでなかったが、水島・佐藤はこの背後に「対称性によって守られたトポロジカル相」の存在があることを明らかにした [3]。つまり、表面に平行に磁場をかけたときには、時間反転対称性と回転対称性を組み合わせた離散対称性が残り、それによって新たに自明でないトポロジカル数が導入され、マヨラナフェルミオンの安定性が保証されることを示した。また、横磁場下のマヨラナフェ

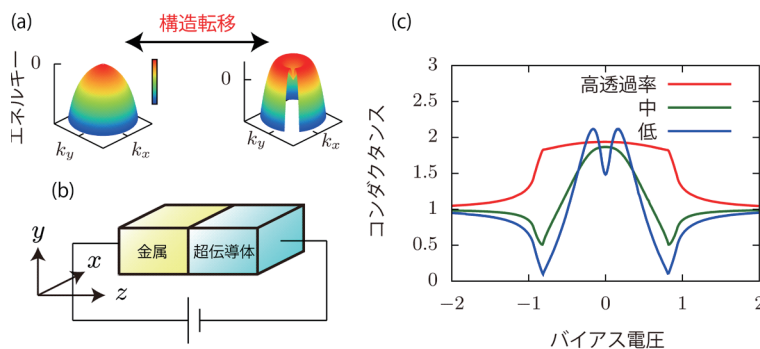


図 1 : (a) トポロジカル超伝導体のケミカルポテンシャルを変化させた際のアンドレーエフ束縛状態の分散関係の変化を示す。  
(b) 接合の図。  
(c) 金属・トポロジカル超伝導体接合の微分コンダクタンス。

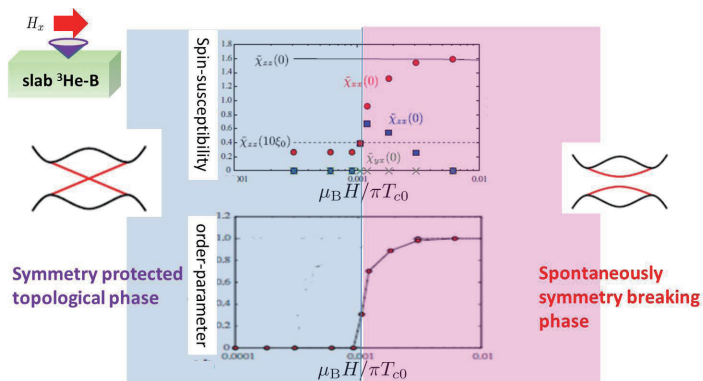


図 2: 横磁場下の  $^3\text{He-B}$  相のトポロジカル量子相転移。横磁場  $H$  が臨界値を超えると、離散対称性のオーダーパラメータが有限の値を取る自発的対称性の破れた相に移るとともに、表面マヨラナフェルミオンが消失する。相転移近傍では、スピン帯磁率に異常が現れる。

ルミオンが、ある臨界磁場において突然消失することを発見し、これが離散対称性の自発的破れに伴うトポロジカル相転移であることを明らかにした。(図 2) この新奇な量子相転移近傍ではスピン帯磁率に異常が期待されるため、B01 班で計画されている制限空間中の超流動  $^3\text{He-B}$  の実験において観測可能である。

### 3. 冷却原子気体の理論 (上田、水島)

スピンという内部自由度を持つボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) 中に形成される量子渦はそれらが発生する量子相によって多彩な構造を示す。我々はその構造を方程式を解くことなく、ホモトピー理論の完全系列を用いて分類することに成功し、それが実際に存在することを多成分グロスピタエフスキー方程式を解くことによって明らかにした [4]。また、2 成分 BEC からなる擬スピン 1/2 系を高速回転させることによって実現される強い量子相関を有する量子渦液体状態をしらべ、ある特定の渦充填率の時に非アーベル統計に従う励起スペクトルをもつスピニングレット状態が出現することを見出した [5]。水島は、新田 (D 班公募) とともに、冷却原子気体において 3 次元スカーミオンが基底状態として安定化し得ることを見いだした [6]。

### 4. 奇周波数クーパー対の理論 (田仲、水島; A01 と連携)

従来型  $s$  波超伝導体の上に載せたナノワイヤーのエッジにおいて、スピン軌道相互作用と外部磁場によりマヨラナ型準粒子励起が創成されることが最近話題になっている。田仲、浅野 (A01) は、マヨラナ型準粒子励起が存在するときには必ず奇周波数クーパー対が存在することを明らかにした [7]。さらに、期待される異常な近接効果は、スピン 3 重項  $p$  波超伝導体

接合ですでに知られている奇周波数クーパー対による異常近接効果 [8] に他ならないことを明確にした。また水島、田仲は、カイラル  $p$  波超伝導体の量子渦に局在した準粒子状態のマヨラナ性と奇周波クーパー対振幅の関係性について明らかにした [9]。

田仲、佐藤、永長 (C01 班) はトポロジカル量子現象に関する総説を執筆した [10]。

[1] A. Yamakage, K. Yada, M. Sato and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 85, 180509 (2012).  
 [2] T. Hashimoto, K. Yada, A. Yamakage, M. Sato, and Y. Tanaka, arXiv: 1209.0656.  
 [3] T. Mizushima, M. Sato, and K. Machida, Phys. Rev. Lett. 109, 165301 (2012).  
 [4] S. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda, Phys. Rev. A 86, 023612 (2012).  
 [5] S. Furukawa and M. Ueda, Phys. Rev. A 86, 031604(R) (2012).  
 [6] T. Kawakami, T. Mizushima, M. Nitta, and K. Machida, Phys. Rev. Lett. 109, 015301 (2012).  
 [7] Y. Asano and Y. Tanaka, arXiv:1204.4226.  
 [8] Y. Tanaka and S. Kashiwaya, Phys. Rev. B 70, 012507 (2004).  
 [9] T. Daino, M. Ichioka, T. Mizushima, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 86, 064512 (2012).  
 [10] Y. Tanaka, M. Sato, and N. Nagaosa, J. Phys. Soc. Jpn., 81, 011013, (2012).